

КЛАССИЧЕСКАЯ «ЗАДАЧА ШУМАНА» ДЛЯ ТЕПЛООБМЕНА В НЕПОДВИЖНОМ СЛОЕ И ТЕПЛОВАЯ РАБОТА СЛОЯ НА КОНВЕЙЕРНОЙ ОБЖИГОВОЙ МАШИНЕ

Аннотация

Выполнено сопоставление решения «задачи Шумана» с результатами математического моделирования тепловой работы слоя на реальной обжиговой машине. Показано, что в отличие от классической задачи, где теплообмен в слое быстро стабилизируется и безразмерная скорость тепловой волны $\Delta Y/\Delta Z$ стремится к единице, на обжиговой машине, вследствие наличия двух тепловых волн (от газа-теплоносителя из горна и за счет экзотермической реакции окисления магнетита), теплообмен в слое стабилизируется медленнее и только в конце нагревательной части машины. Постепенная стабилизация теплообмена по длине машины облегчает определение длины зоны тепловой инерции и оптимизацию температурно-фильтрационного режима на обжиговой машине.

Ключевые слова: теплообмен в слое, тепловая волна, скорость движения волны, зона тепловой инерции.

Abstract

“Schuman problem” had been compared with the results of thermal performance math modeling on the operating straight grate travelling indurating machine (IM). As per comparison outcome, heats exchanging process in the pellet bed is getting stabilized slower at the end part of straight grate travelling IM only. That is due to presence of two thermal waves (heat carrier gas from the hood and exothermal reaction of magnetite oxidation). Conversely, the classical task is different, heat exchange in the pellet bed is being quickly stabilized, and dimensionless speed of thermal wave $\Delta Y/\Delta Z$ tends to 1 point. The gradual stabilization of heat exchange within straight grate travelling IM length facilitates a length determination of thermal inertia zone and optimization of temperature gas-through-pellet-bed velocity on the straight grate travelling IM.

Keywords: heat exchange in the pellet bed, thermal wave, wave travel speed, thermal inertia zone.

Классическая задача о теплообмене в неподвижном слое или при перекрытой схеме движения теплоносителя, как это имеет место на обжиговой конвейерной машине (ОКМ), получила в России название «задача Шумана». Решение этой задачи первоначально было выполнено при условии постоянства температуры газа на входе в слой и при неизменных теплофизических свойствах газа и материала слоя. Подробное рассмотрение и анализ решения этой задачи представлены в книге Б. И. Китаева с сотрудниками [1]. Авторы отметили

основополагающую роль «задачи Шумана» в дальнейшем развитии математического описания теплообмена в слоевых технологических процессах и, в частности, при определении коэффициента теплоотдачи в слое. Решение этой задачи при условии независимости температуры газа (t_{Γ}) от времени (τ), т.е. при $\frac{\Delta t_{\Gamma}}{\Delta \tau} = 0$, для очень малой высоты слоя дает небольшую погрешность [1]. Показано, что теплообмен в неподвижном слое определяется

двумя безразмерными параметрами: безразмерной высотой слоя $Y = \frac{\alpha_v H}{w_{\Gamma} c_{\Gamma}}$ и безразмерным

временем $Z = \frac{\alpha_v \tau}{c_M \rho_M}$, где α_v – коэффициент теплоотдачи, отнесенный к единице объема

слоя; H – высота слоя; w_{Γ} – скорость потока газа на свободное сечение аппарата; c_{Γ}, c_M – теплоемкость газа и материала; τ – время; ρ_M – насыпная масса материала на единицу объема слоя.

На рис. 1 представлена классическая диаграмма изменения относительной температуры материала Θ по высоте слоя и во времени, из которой следует, что процесс теплообмена стабилизируется во времени так, что отрезки безразмерных параметров ΔY и ΔZ становятся

равными друг другу. Поскольку отношение $\frac{\Delta Y}{\Delta Z} = \frac{\Delta H}{\Delta \tau} \cdot \frac{c_M \rho_M}{w_{\Gamma} c_{\Gamma}}$ не что иное, как скорость дви-

жения тепловой (температурной) волны по высоте слоя, следовательно, и скорость тепловой волны со временем становится постоянной. Это следует из данных рис. 2, где представлены результаты обработки решения задачи Шумана в виде зависимости скорости движения тепловой волны $\Delta Y / \Delta Z$ от времени для различных уровней прогрева слоя. На этом графике видно, что безразмерная скорость движения тепловой волны на всех уровнях прогрева слоя со временем стремится к единице.

На рис. 3 представлены результаты расчета теплового состояния слоя для реальной ОКМ Оскольского электрометаллургического комбината с площадью 480 м². Расчеты выполнены с помощью математической модели НПВП ТОРЭКС [2], адаптированной по данным экспериментальных исследований, выполненных нами в 2012 году. Как видно на этом графике, имеется качественное подобие с решением задачи Шумана на рис. 1. Однако термограммы после зоны сушки (примерно 25 м) имеют более сложный характер даже в области примерно постоянной температуры на поверхности слоя, что объясняет наличие сильного теплового источника в объеме слоя за счет экзотермического эффекта реакции окисления магнетита в окатышах.

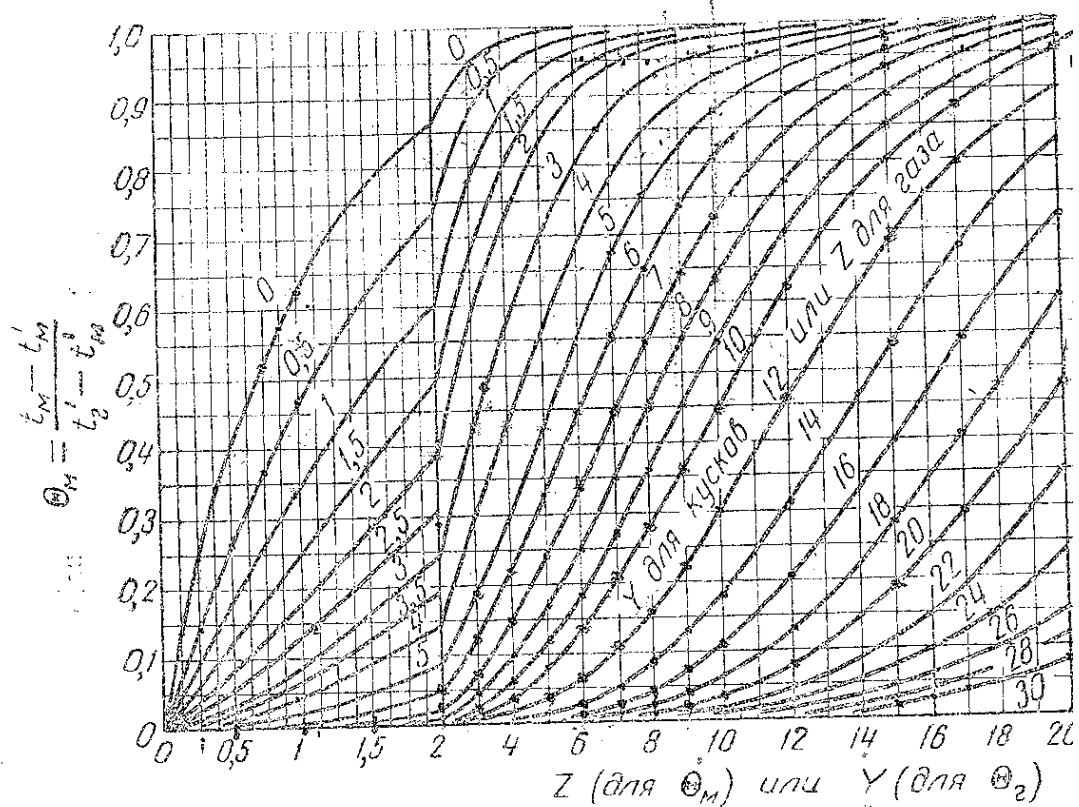


Рис. 1. График для расчета нагрева засыпки из кусков твердого материала потоком воздуха или газа

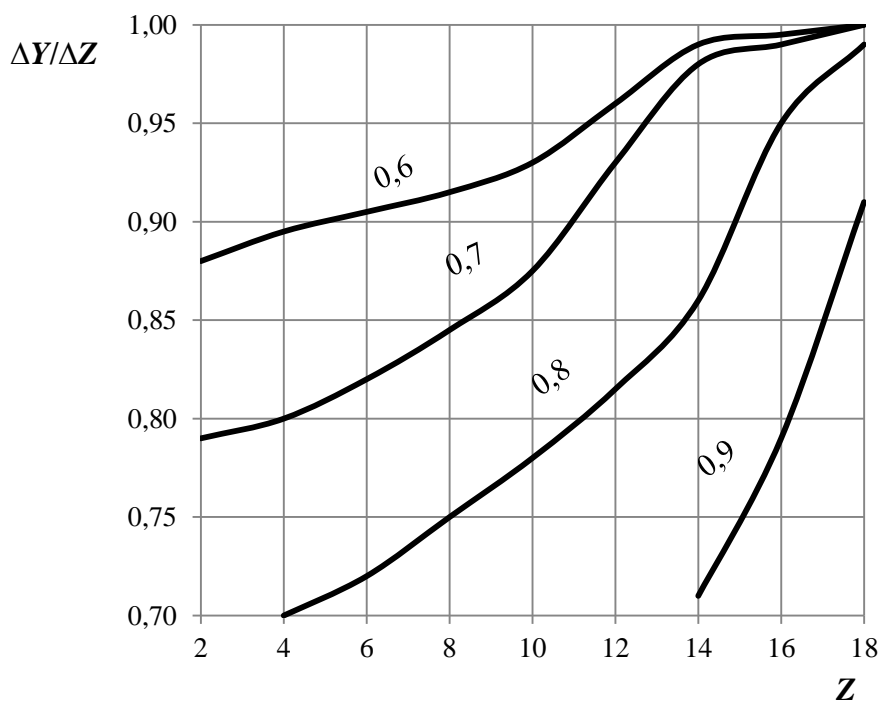


Рис. 2. Зависимость скорости движения тепловой волны $\Delta Y/\Delta Z$ от безразмерного времени Z в задаче Шумана (на кривых значения относительной температуры материала Θ)

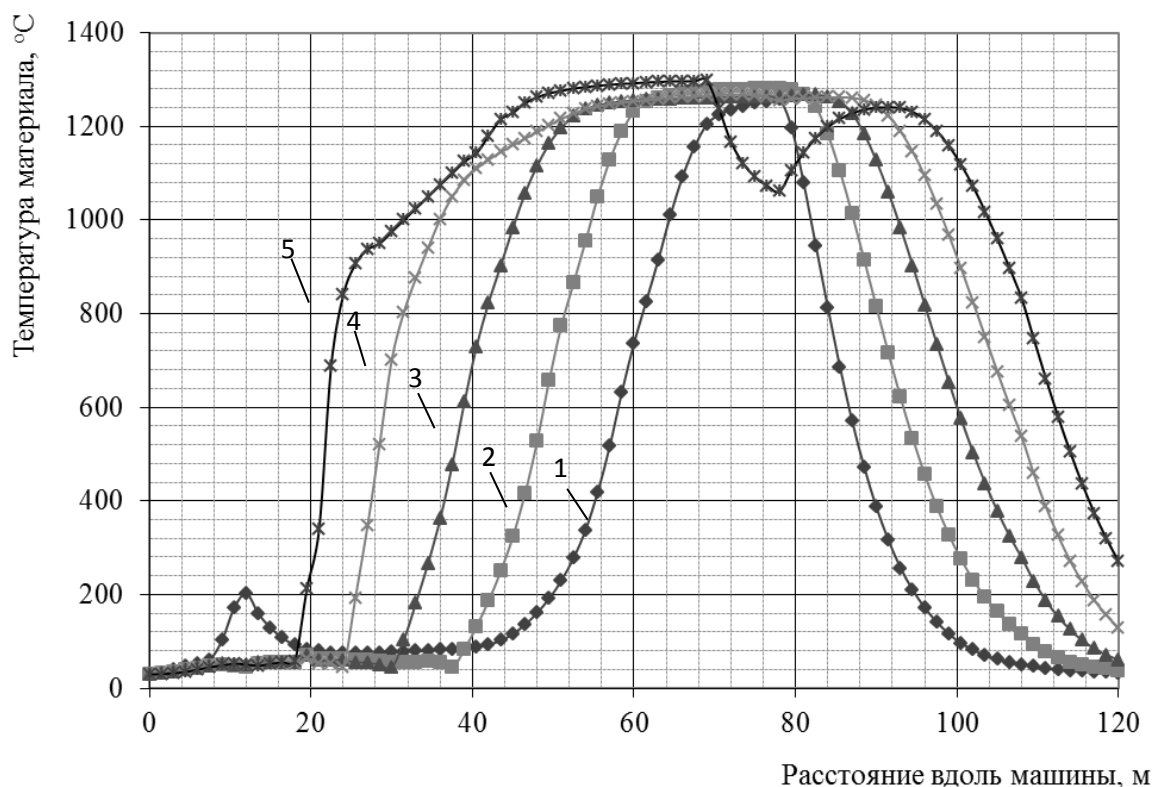


Рис. 3. Результаты расчета теплового состояния слоя для реальной ОКМ

(цифры у кривых – расстояние от колосников:

1 – 100 мм; 2 – 180 мм; 3 – 260 мм; 4 – 340 мм; 5 – 420 мм)

Поскольку ранее были предприняты попытки непосредственного использования задачи Шумана для анализа теплообмена в слое ОКМ (с заменой физической теплоемкости окатышей величиной кажущейся теплоемкости, включающей тепловой эффект реакции) [3], следует сравнить скорости тепловой волны в реальном слое окатышей с рис. 2. Для этого термограммы на рис. 3 были пересчитаны в виде безразмерных параметров Y и Z , а затем были определены зависимости безразмерной скорости движения тепловой волны $\Delta Y/\Delta Z$ от безразмерного времени Z . Эта зависимость представлена на рис. 4, так же для различных уровней прогрева слоя, как и на рис. 2. Для реального слоя окатышей на ОКМ вид этой зависимости существенно отличается от данных на рис. 2, это определяется постепенным развитием, а затем затуханием экзотермической реакции окисления магнетита по длине машины в диапазоне от 30 до 60 м (рис. 3), что соответствует диапазону по $Z=6 \div 10$. Особенно сильно увеличивается скорость тепловой волны именно в этом диапазоне $Z=6 \div 10$. Однако, на основании графиков на рис. 4 может быть сделан очень важный вывод о том, что и в реальном слое при обжиге окатышей скорость движения тепловой волны при $Z > 10$ стабилизируется. Это важно для определения длины зоны тепловой инерции (ЗТИ), поскольку в этой области можно обойтись без специального усреднения скорости фильтрации газа по длине машины.

Роль зоны тепловой инерции на обжиговых машинах, определяющей удельный расход топлива и прогрев низа слоя, достаточно проиллюстрирована в книге [2]. Здесь рассмотрим этот вопрос кратко, в связи со скоростью движения тепловой волны по высоте слоя.

Насыпной слой окатышей высотой 300–400 мм обладает значительной тепловой инерцией и чем ближе характер теплообмена к «завершенности», характеризуемой степенью

приближения температуры низа слоя к максимальной температуре теплоносителя в горне машины, тем более ярко выражено явление образования в слое тепловой или температурной волны. Скорость движения этой волны (V_t) и определяет момент максимального нагрева низа слоя при прочих равных условиях. Следовательно, по ходу движения обжиговой машины перед зоной охлаждения имеется зона тепловой инерции (ЗТИ), где начальная температура теплоносителя, в отличие от скорости фильтрации, практически не влияет на конечный прогрев низа слоя. При этом максимальный прогрев низа слоя при равном расходе топлива будет достигнут в случае сосредоточения подачи высокотемпературного теплоносителя перед ЗТИ и в самом ее начале. Это обеспечит резерв повышения производительности машины и снижение удельного расхода топлива при заданном качестве обожженных окатышей.

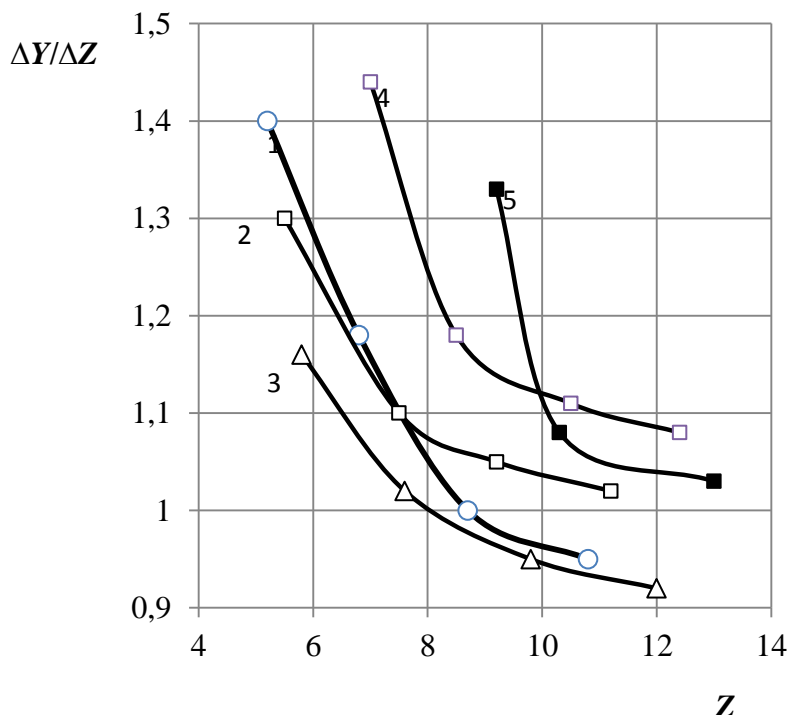


Рис. 4. Зависимость скорости движения тепловой волны от безразмерного времени Z в слое окатышей на обжиговой машине (кривые при $t, \Theta = \text{const}$: 1 – 400 °C, 0,32; 2 – 600 °C, 0,48; 3 – 800 °C, 0,63; 4 – 1000 °C, 0,79; 5 – 1100 °C, 0,87)

Для определения скорости тепловой волны запишем тепловой баланс для элемента слоя толщиной Δy за время $\Delta \tau$ для условий окислительного обжига окатышей, т. е. при наличии внутреннего распределенного по высоте источника теплоты в слое.

$$\Delta y \cdot \rho_m \cdot c_m \cdot \Delta t_m = \Delta \tau \cdot w_g \cdot c_g \cdot \Delta T_g + q_{\text{ок}} \cdot \rho_m \cdot \Delta \phi_{\text{ок}} \cdot \Delta y, \quad (1)$$

где ρ_m, c_m – насыпная плотность и теплоемкость окатышей; Δt_m – изменение температуры окатышей за время $\Delta \tau$; w_g, c_g – скорость фильтрации и теплоемкость газа; ΔT_g – изменение температуры газа на высоте Δy ; $q_{\text{ок}}, \Delta \phi_{\text{ок}}$ – удельная теплота реакции окисления и изменение степени окисления окатышей за время $\Delta \tau$.

Поделив левую и правую части соотношения (1) на $\Delta \tau \cdot \Delta t_m$, получим выражение для скорости движения тепловой (температурной) волны V_t

$$V_t = \frac{\Delta y}{\Delta \tau} = \frac{W_{\Gamma} C_{\Gamma}}{\rho_M C_M} \cdot \frac{\Delta T_{\Gamma}}{\Delta t_M} \cdot \frac{1}{1 - \frac{q_{ок}}{C_M} \cdot \frac{\Delta \varphi_{ок}}{\Delta t_M}}, \quad (2)$$

где первая часть выражения (2) является соотношением теплоемкостей потоков материала и газа, а время $\Delta \tau$ определяется делением отрезка длины машины на скорость ее движения.

Подстановка численных значений величин, входящих в выражение (2), показала, что скорость движения тепловой волны увеличивается за счет теплоты окисления магнетита в 1,5–2,0 раза. Отсюда следует важный вывод, что для реальной обжиговой машины оперативно определить скорость движения тепловой волны в слое расчетным путем по соотношению (2) практически невозможно. Это объясняется тем, что по длине машины определяющие ве-

личины в (2) изменяются, а величина $\frac{\Delta \varphi_{ок}}{\Delta t_M}$ вообще неизвестна. Следовательно, для этого

нужно использовать экспериментальные термограммы, получаемые путем закладки гибких термопар по высоте слоя, или расчетные термограммы, получаемые с помощью адаптированной математической модели. Если эти термограммы строго соответствуют полной высоте слоя H , то скорость движения тепловой волны определяется из соотношения

$$V_t = \frac{\Delta H \cdot U_{\Gamma}}{\Delta L}, \quad (3)$$

где U_{Γ} – скорость движения ленты.

Отсюда длина зоны тепловой инерции может быть определена следующим образом

$$\Delta L_{\text{зти}} = \Delta L = \frac{H \cdot U_{\Gamma}}{V_t}. \quad (4)$$

Но это выражение строго справедливо лишь в случае, когда на длине участков ΔL и $\Delta L_{\text{зти}}$ одинаковы скорости фильтрации и скорости окисления магнетита, как это следует из (2).

Результаты анализа термограмм в слое реальной обжиговой машины, представленные на рис. 4, показали, что скорость тепловой волны стабилизируется к концу нагревательных зон машины (при $Z > 10$). Следовательно, определение длин зоны тепловой инерции по расчетным термограммам значительно упрощается и может быть выполнено без усреднения скорости фильтрации на участке длины машины, соответствующем длине ЗТИ. Тем более, что для практических условий требуется вычисление длины зоны тепловой инерции с точностью до длины одной вакуум-камеры.

Список использованных источников

1. Китаев Б. И., Ярошенко Ю. Г., Сучков В. Д. Теплообмен в шахтных печах. Свердловск: Metallurgizdat, 1957.
2. Боковиков Б. А., Брагин В. В., Евстюгин С. Н. и др. Теплофизические закономерности термообработки железорудных окатышей на конвейерной машине. Екатеринбург: «Уральский центр академического обслуживания», 2013.

3. Братчиков С. Г., Берман Ю. А., Белоцерковский Я. Л. и др. Теплотехника окискования железорудного сырья. М.: Metallurgy, 1970. С. 36–38.

УДК 669.053

В. Н. Буинцев, И. А. Рыбенко

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет»,

г. Новокузнецк, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ТРЕНАЖЕР ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ АГЛОМЕРАТА

Аннотация

Рассмотрены существующие проблемы производства агломерата с заданными физико-химическими свойствами в условиях изменяющегося состава компонентов шихтовых материалов и их параметров. Предложено решение этой проблемы с помощью математического моделирования процесса и создания тренажерно-обучающей системы.

Разработана математическая модель шихтовки, которая может быть использована как советчик агломератчика при принятии решения на управление, так и как учебно-тренирующее устройство. Вторая часть математической модели используется как модель-имитатор при поиске максимальных методов загрузки агломашины и оптимальной шихтовки заданной марки агломерата. Особое внимание при тренировках обучаемых уделяется приобретению навыков получения агломерата заданного качества при изменении состава и качества исходных компонентов шихты.

Тренажер «Агломератчик» успешно использован для обучения операторов агломерационных машин и студентов металлургических специальностей.

Ключевые слова: агломерат, математическое моделирование, тренажер, обучение, оптимизация.

Abstract

Existing problems of production of agglomerate with the set physical and chemical properties in the conditions of changing structure of components the shikhtovykh of materials and their parameters are considered. The solution of this problem by means of mathematical modeling of process and creation of training training system is proposed.

The mathematical model of a shikhtovka which can be used as the adviser of an agglomerant at decision-making on management and as the educational training device is developed. The second part of mathematical model is used as model simulator by search of the maximum methods of loading агломашины and an optimum shikhtovka of the set brand of agglomerate. The special attention when trainings trainees is paid to acquisition of skills of receiving agglomerate of the set quality at change of structure and quality of initial components of furnace charge.

The Agglomerant exercise machine is successfully used for training of operators of agglomerative cars and students of metallurgical.